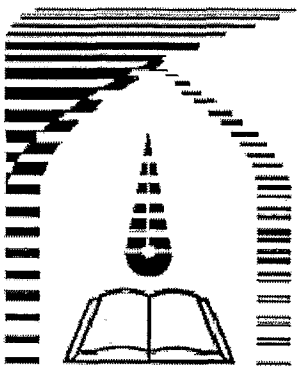
٨٧١,١٠٨٧٢٩
٨٨,٢,٢
٣٤٥٣
زراع

١٠٩٩٠٠

به نام خدا

۸۷/۱/۱۰/۸۷۲۹
۸۸ /۱۲۶



**دانشگاه تربیت مدرس**

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی صنایع:

# طراحی و حل مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت

محمد حسین زارع

تسویه مدارک

استاد راهنما:
دکتر محمد مهدی سپهری

۱۳۸۸ /۱/ ۱۸

پاییز ۱۳۸۷

۱۰۹۹۰۰

## آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی صنایع است که در سال ۱۳۸۷ در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب محمد حسن زراع دانشجوی رشته مهندسی صنایع مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محمد حسن زراع

تاریخ و امضا: ۱۳۸۷/۱۱/۱۷

بسمه تعالی

# تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

**آقای محمد حسین زارع** پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان طراحی وحل مسئله کلی حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت** در تاریخ ۱۳۸۷/۹/۱۸ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع - مهندسی صنایع پیشنهاد می کنند.

| عضو هیات داوران | نام و نام خانوادگی | رتبه علمی | امضا |
|---|---|---|---|
| استاد راهنما | دکتر محمد مهدی سپهری | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر الیپس مسیحی | استادیار | |
| استاد ناظر | دکتر سید کمال چهارسوقی | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر عزیز جعفری | استادیار | |
| مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی) | دکتر سید کمال چهارسوقی | دانشیار | |

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

## دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

**مقدمه:** با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

**ماده ۱**- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

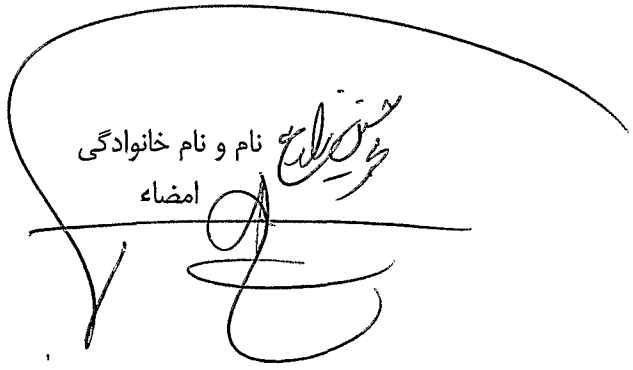
**ماده ۲**- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

**ماده ۳**- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

**ماده ۴**- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

**ماده ۵**- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.



## چکیده

در این پایان‌نامه مسئله‌ای بدیع به نام **مسئله خوشه ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت**[1] را ارائه می‌کنیم. این مسئله نمونه‌ای است از مسائل کلی که در شبکه‌های سلسله مراتبی[2] مطرح هستند. در این شبکه‌ها گره‌ها، درون خوشه‌هایی گروه‌بندی می‌شوند. در نتیجه ارتباطات بین خوشه‌ای در آنها اهمیت می‌یابند. به دلیل عدم وجود یال میان خوشه‌ها برای برقراری ارتباط میان آنها ناگزیر از ایجاد یال هستیم که این کار مستلزم پرداخت هزینه ثابت است. مسئله مورد بحث در این مقاله عبارتست از بررسی و طراحی همزمان شبکه درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای و مسیریابی چندین کالا در شبکه با هدف کمینه سازی هزینه‌ها. بر اساس آخرین اطلاعات ما بررسی همزمان شبکه درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای علیرغم اهمیت بالای آن تاکنون مورد مطالعه واقع نشده و در این پایان نامه برای نخستین بار مطرح و مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور مسئله مزبور را در ۳ حالت بررسی کرده و برای هر یک مدل ریاضی از نوع عدد صحیح آمیخته ارائه[3] می‌دهیم. پس از حل این مسئله در ۳ حالت فوق، پاسخ‌های بدست آمده برای مسائل با ابعاد گوناگون را با یکدیگر مقایسه و نتایج را تحلیل می‌کنیم. نتایج محاسباتی برای ۵ گروه ۱۰ تایی مسئله محاسبه شده است. این مسائل دارای حداکثر ۱۲۰ گره، ۱۰ خوشه و ۸ نوع کالا هستند. یکی از دستاوردهای مهم این پایان نامه اثبات این ادعا است که برای حل این مسئله بهترین رویکرد آزاد گذاشتن مدل ریاضی برای تصمیم گیری است. به بیان بهتر تصمیم‌گیری برای ایجاد شبکه در درون و بیرون خوشه‌ها باید به عهده مدل باشد.



کلمات کلیدی: شبکه‌های سلسله مراتبی، شبکه‌های بین خوشه‌ای، شبکه درون خوشه‌ای، مسائل با هزینه ثابت، هاب، خوشه


---

1. Clustered fixed charge multi commodity transshipment problem(CFCMTP)
2. Hierarchical
3. Mixed Integer Programming

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**

فهرست جداول ج
فهرست شکل‌ها د
فهرست نمودارها ه

**فصل اول: معرفی کلیات**

۱-۱) سرآغاز فصل نخست ۱
۱-۲) ساختار کلی گزارش ۲
۱-۳) واژگان ۴
۱-۴) معرفی مسئله ۵
۱-۵) جایگاه مسئله تحقیق ۷
۱-۶) معرفی مسائل مرتبط ۸
۱-۶-۱) معرفی مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت ۹
۱-۶-۱-۱) نمادگذاری ۱۰
۱-۶-۱-۲) مدل ریاضی ۱۱
۱-۶-۲) معرفی مسائل کلی طراحی شبکه ۱۲
۱-۶-۳) معرفی مسئله کلی طراحی شبکه با هزینه ثابت ۱۳
۱-۶-۳-۱) نمادگذاری ۱۵
۱-۶-۳-۲) مدل ریاضی ۱۵
۱-۶-۴) معرفی مسائل مربوط به شبکه های سلسله مراتبی ۱۷
۱-۷) اهداف و اهمیت مسئله ۱۷
۱-۸) کاربردهای مسئله ۱۹
۱-۹) سرانجام فصل نخست ۲۱

**فصل دوم: مرور ادبیات**

۲-۱) سرآغاز فصل دوم ۲۲
۲-۲) مرور ادبیات مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت ۲۳
۲-۲-۱) مسئله طراحی شبکه بدون ظرفیت با هزینه ثابت ۲۳
۲-۲-۲) مسئله طراحی شبکه دارای ظرفیت با هزینه ثابت ۲۹
۲-۳) مرور ادبیات مسئله کلی طراحی شبکه با هزینه ثابت ۳۵
۲-۴) تحلیل ادبیات ۳۶
۲-۵) سرانجام فصل دوم ۳۸

## فصل سوم: معرفی مسئله

۳-۱) سرآغاز فصل سوم ۴۰
۳-۲) مفهوم خوشه و هاب ۴۱
۳-۳) تعریف مسئله و انواع آن ۴۲
۳-۳-۱) مسئله نوع اول ۴۳
۳-۳-۲) مسئله نوع دوم ۴۴
۳-۳-۳) مسئله نوع سوم ۴۵
۳-۴) بیان نوآوری ۴۶
۳-۵) نمادگذاری مسئله ۴۸
۳-۶) مدلسازی ریاضی مسئله ۴۹
۳-۶-۱) مدل ریاضی مسئله نوع اول ۴۹
۳-۶-۲) مدل ریاضی مسئله نوع دوم ۵۱
۳-۶-۳) مدل ریاضی مسئله نوع سوم ۵۲
۳-۷) سرانجام فصل سوم ۵۳

## فصل چهارم: نتایج محاسباتی

۴-۱) سرآغاز فصل چهارم ۵۴
۴-۲) اهداف ۵۴
۴-۳) روش حل ۵۶
۴-۴) نحوه محاسبه فاصله از جواب بهینه ۵۷
۴-۵) مسائل مورد استفاده ۵۸
۴-۶) نتایج محاسباتی ۶۱
۴-۷) تحلیل نتایج ۶۹
۴-۸) سرانجام فصل چهارم ۷۱

## فصل پنجم: جمع بندی و نتیجه گیری

۵-۱) سرآغاز فصل پنجم ۷۲
۵-۲) مروری بر فصل‌های گذشته ۷۲
۵-۳) نوآوری و دستاوردهای تحقیق ۷۴
۵-۴) پژوهش‌های آتی ۷۵
۵-۵) سرانجام فصل پنجم ۷۶

## فهرست منابع

۷۷

# فهرست جداول

| جدول | صفحه |
| --- | --- |
| جدول شماره (۳-۱) | ۴۶ |
| جدول شماره (۴-۱) | ۶۰ |
| جدول شماره (۴-۲) | ۶۰ |
| جدول شماره (۴-۳) | ۶۲ |
| جدول شماره (۴-۴) | ۶۴ |
| جدول شماره (۴-۵) | ۶۵ |
| جدول شماره (۴-۶) | ۶۷ |
| جدول شماره (۴-۷) | ۶۸ |

# فهرست شکل‌ها


| شکل | صفحه |
| --- | --- |
| شکل شماره (۱-۱- الف) | ۶ |
| شکل شماره (۱-۱- ب) | ۶ |
| شکل شماره (۱-۲) | ۸ |
| شکل شماره (۱-۳- الف) | ۱۴ |
| شکل شماره (۱-۳- ب) | ۱۴ |
| شکل شماره (۱-۴) | ۲۰ |
| شکل شماره (۲-۱) | ۳۸ |
| شکل شماره (۳-۱) | ۴۴ |
| شکل شماره (۳-۲) | ۴۵ |
| شکل شماره (۳-۳) | ۴۶ |

# فهرست نمودارها

| نمودار | صفحه |
| --- | --- |
| نمودار شماره (۴-۱) | ۶۳ |
| نمودار شماره (۴-۲) | ۶۵ |
| نمودار شماره (۴-۳) | ۶۶ |
| نمودار شماره (۴-۴) | ۶۸ |
| نمودار شماره (۴-۵) | ۶۹ |

# فصل اول:
# معرفی کلیات

## ۱-۱) سرآغاز فصل نخست

مدل‌های طراحی ساختار شبکه در حوزه‌های گوناگونی مانند ارتباطات، حمل و نقل، تامین کالا و تولید دارای کاربردهای فراوانی هستند. ساختار کلی این مدل‌ها به شکل زیر است: شبکه‌ای متشکل از تعدادی یال و گره وجود دارد که با هدف تامین نیاز هر یک از گره‌ها، جریانی از مواد باید از یال‌ها عبور کند. در این میان ممکن است یال-های شبکه دارای ظرفیت محدودی باشند. در بیشتر شبکه‌ها فرض بر اینست که تنها هزینه موجود در شبکه، هزینه ناشی از حمل و نقل کالا و یا ارسال آنها است در حالیکه در برخی از موارد کاربردی، این فرض دور از ذهن به نظر می‌رسد. در چنین مواردی مانند شبکه حمل و نقل بین شهری، نه تنها حمل و نقل مواد در جاده‌ها هزینه زا است بلکه برای احداث جاده (یال) میان شهرها (گره‌ها) نیز باید هزینه جداگانه‌ای صرف شود. بنابراین در این دسته از شبکه‌ها برای عبور جریان از یال‌ها و دستیابی به هدف شبکه که تامین عرضه و تقاضای گره‌ها است، باید دو نوع هزینه پرداخت کرد: هزینه انتقال و هزینه ایجاد یال. مجموع هزینه‌های انتقال در یک شبکه به میزان مواد جابجا شده در آن شبکه بستگی دارد در حالیکه هزینه ایجاد یک یال مستقل از میزان مواد جابجا شده از طریق آن است. به بیان دیگر هزینه‌های انتقال، هزینه متغیر و هزینه ایجاد یال، هزینه ثابت است.

در ادبیات مسائل طراحی ساختار شبکه، این دسته از مسائل "طراحی شبکه با هزینه ثابت"[1] نامیده می‌شود. هدف در این مسائل، طراحی شبکه‌ایست که در آن تقاضای هر یک از گره‌ها تامین شده و مجموع هزینه‌های ایجاد یال‌ها و انتقال جریان از آنها کمینه گردد. این مسئله از جمله مسائل مشهور و پراهمیت در زمینه طراحی شبکه است و تاکنون به شکل گسترده‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. برخلاف ظاهر ساده و بیان آسان، حل این دسته از مسائل بسیار مشکل است. به طوریکه این مسئله به لحاظ پیچیدگی از دسته مسائل *NP-hard* است (*T.L.MAGNANTI and R.T.WONG,1984*).

[1] - Fixed Charge network design problem

در زمینه مسائل طراحی شبکه، شبکه‌های سلسله مراتبی[1] نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. دلیل این امر وجود ارتباطات چند لایه میان گره‌ها در شبکه است. همچنین کاربرد زیادی که این نوع از شبکه‌ها در دنیای ارتباطات و حمل و نقل دارند سبب توجه بیشتر به آن شده است. شبکه‌های سلسله مراتبی از تعداد مشخصی گره و خوشه[2] تشکیل شده‌اند که هر یک از گره‌ها تنها به یک خوشه تعلق دارد. وجود خوشه در این شبکه‌ها سبب بوجود آمدن دو لایه شبکه خواهد شد: شبکه میان گره‌ها یا شبکه درون خوشه‌ای و شبکه بین خوشه‌ای[3]. در این میان توجه اکثر محققان بیشتر به شبکه بین خوشه‌ای جلب شده در نتیجه کمتر به شبکه‌های درون خوشه‌ای پرداخته‌اند.

با توجه به مطالب فوق، طراحی شبکه‌های سلسله مراتبی دارای هزینه ثابت دارای پیچیدگی‌های زیادی خواهد بود. در عین حال این شبکه‌ها از جذابیت زیادی برخوردارند. در همین راستا پایان نامه پیش رو اختصاص دارد به طراحی یک شبکه ارتباطی دارای هزینه ثابت میان گره‌ها در یک شبکه سلسله مراتبی. به این منظور مسئله جدیدی را برای نخستین بار معرفی می‌کنیم که "مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت"[4] نام دارد. ساختار این مسئله به گونه‌ایست که از یکسو در گروه مسائل طراحی شبکه با هزینه ثابت و از سوی دیگر در گروه شبکه-های سلسله مراتبی قرار می‌گیرد. هدف از این پایان نامه معرفی کامل و دقیق این مسئله و طراحی مدل ریاضی برای آن است. همچنین در این پایان نامه سعی ما بر این بوده است که با در نظر گفتن مفروضات به حل این مسئله پرداخته و نقش آنها را بر مسئله بررسی کنیم. مشروح این اقدامات در فصل‌های بعد ارائه خواهد شد.

## ۱-۲) ساختار کلی گزارش

در طراحی ساختار گزارش پیش رو سعی بر این بوده است که خواننده قدم به قدم با مسئله تحقیق و شیوه حل آن آشنا گردد. برای دستیابی به این هدف، ساختار این گزارش به شکل زیر طراحی شده است: در ابتدا و در فصل اول به طور مختصر مسئله را معرفی کرده و به بیان کلیات، مفاهیم و واژگان مرتبط با آن می‌پردازیم. سپس درباره جایگاه آن در حوزه طراحی شبکه مطالبی بیان می‌کنیم و آنگاه چهار دسته از مسائل بسیار مهم که در ارتباط مستقیم با آن هستند را معرفی می‌کنیم. در این میان دو مسئله که از اهمیت بیشتری برخوردارند را کاملتر معرفی خواهیم کرد. این دو مسئله عبارتند از مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت[5] و مسئله کلی طراحی شبکه با هزینه ثابت[6]. اهمیت این دو مسئله از آنجاست که زیربنای مسئله اصلی مطرح شده در تحقیق هستند بنابراین معرفی دقیق

---

[1] - Hierarchical
[2] - Cluster
[3] - Backbone Network
[4] - Clustered Fixed Charge Network Design Problem (CFCNDP)
[5] - Fixed charge network design problem
[6] - Generalized Fixed charge network design problem

آنها ضرورت دارد. فصل اول را با بیان مطالبی درباره اهمیت مسئله و جایگاه آن و کاربردهای آن به پایان خواهیم برد.

در فصل دوم به ادبیات دو مسئله اشاره شده خواهیم پرداخت. مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت یکی از مسائل قدیمی در حوزه مسائل طراحی شبکه است و از زمان معرفی آن تاکنون پژوهشگران زیادی آنرا مورد مطالعه قرار داده‌اند و مقالات زیادی در این زمینه وجود دارد. بنابراین ادبیات آن از گستردگی زیادی برخوردار است. قسمت اول فصل دوم به مرور ادبیات این مسئله و اقدامات صورت گرفته مرتبط با آن اختصاص دارد. در قسمت دوم از این فصل به مرور ادبیات مسئله کلی طراحی شبکه با هزینه ثابت اختصاص دارد. این مسئله در مقایسه با مسئله اول قدمت کمتری دارد، بنابراین فعالیتهای کمتری در ارتباط با آن صورت گرفته است. همچنین در انتهای فصل دوم تحلیل از ادبیات این دو مسئله ارائه می‌کنیم.

پس از آشنایی کامل و دقیق با مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت و مسئله کلی طراحی شبکه با هزینه ثابت و مطالعه ادبیات آنها، هنگام معرفی مسئله اصلی این تحقیق است. فصل سوم کاملاً به این امر اختصاص دارد. پس از مقدمه‌ای کوتاه در این فصل، با نمادگذاری و مدل ریاضی آن آشنا خواهیم شد. سپس این مدل ریاضی را به طور کامل شرح می‌دهیم و مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین درباره روش حل این مسئله توضیحاتی را بیان می‌کنیم.

اعتبارسنجی و تصدیق مدل ریاضی پیشنهاد شده مستلزم اجرای آن بر روی مسائل با ابعاد متفاوت است. به این منظور مدل پیشنهادی خود را به روی مسائل زیادی اجرا کرده و نتایج این محاسبات را در فصل چهارم ارائه کرده‌ایم. همچنین با تحلیل جواب‌های بدست آمده دلایلی برای آن ذکر خواهیم کرد. پایان بخش این گزارش جمع‌بندی و نتیجه گیری است که این کار را با مروری بر مطالب بیان شده در فصول گذشته انجام می‌دهیم. همچنین در انتهای این پایان نامه موضوعاتی را که می‌تواند در آینده زمینه مطالعات و پژوهش قرار گیرد معرفی خواهیم کرد.

## ۱-۳) واژگان

در این قسمت به توضیح مختصر واژگان کلیدی و متداول به کار رفته در این پایان نامه می‌پردازیم. هدف از این کار آشنایی بهتر خوانندگان با مباحث مطرح شده است.

- شبکه[۱]: به طور کلی واژه شبکه را می‌توان به هر مجموعه به هم پیوسته و متصل نسبت داد که هدف از آن به اشتراک گذاشتن یک قابلیت یا توانایی یا کالا بین چند زیر سیستم دیگر است.
- گره[۲]: مجموعه‌ای است که یکی از عوامل اصلی تشکیل دهنده شبکه است. گره در شبکه مرکزی است که داشته‌های خود را با سایر گره‌ها به اشتراک می‌گذارد و از این طریق نیاز سایر گره‌ها در شبکه تامین می‌شود.
- یال[۳]: مسیری است در شبکه که سبب اتصال گره‌ها به یکدیگر می‌شود و ازاین طریق ارتباط گره‌ها با هم و تبادل جریان میان آنها را امکانپذیر می‌سازد. یال در یک شبکه فاقد جهت است.
- سویه[۴]: تعبیر دیگری است از یال با این تفاوت که سویه دارای جهت و یال فاقد جهت است.
- شبکه‌های یک سطحی: شبکه‌هایی هستند که از تعدادی گره و یال یا سویه تشکیل شده‌اند.
- خوشه[۵]: مجموعه‌ای است متشکل از تعدادی گره. تشابه تعدادی گره باعث می‌شود که در یک خوشه قرار گیرند.
- هاب[۶]: گرهی است در یک خوشه که ارتباطات سایر گره‌ها در خوشه با بیرون خوشه، از طریق این گره انجام می‌گیرد.
- شبکه سلسله مراتبی[۷]: شبکه‌ایست که از گره‌های آن در تعداد مشخصی خوشه دسته‌بندی شده‌اند. در یک شبکه سلسله مراتبی دو لایه از ارتباطات معنی دارد: ارتباطات گره‌های یک خوشه با یکدیگر و ارتباطات یک گره با گره‌های سایر خوشه‌ها.
- شبکه‌های درون خوشه‌ای[۸]: شبکه‌ایست که تنها درون یک خوشه معنا پیدا دارد. یک شبکه درون خوشه‌ای از گره‌های درون آن خوشه و یال‌هایی که آنها را به یکدیگر متصل می‌کند تشکیل شده است.
- شبکه‌های درون خوشه‌ای[۹]: شبکه ای است که بیرون از یک خوشه معنا دارد. این شبکه وظیفه اتصال خوشه‌ها به یکدیگر را به عهده دارد. گره‌ها در شبکه بین خوشه‌ای از گره‌های هاب تشکیل شده‌اند.

---

1 - Network
2 - Node
3 - Edge
4 - Arc
5 - Cluster
6 - Hub
7 - Hierarchical Networks
8 - Tributary Network
9 - Backbone Network

- طراحی شبکه[1]: عبارت است از تعیین میزان جریان و مسیر عبور آن در یک شبکه از هر گره به سایر گره‌ها در یک شبکه.

## ۱-۴) معرفی مسئله

مجموعه $N$ شامل گره‌های موجود در یک گراف است. این گره‌ها در خوشه‌هایی دسته‌بندی شده‌اند. مجموعه خوشه‌ها را با $C$ نمایش می‌دهیم. توجه داریم که هر گره تنها به یک خوشه تعلق دارد. به بیان بهتر مجموعه گره‌ها به مجموعه‌هایی به نام خوشه افراز شده‌اند. فرض می‌کنیم که گره‌های درون هر خوشه توسط یک شبکه همبند با یکدیگر در ارتباط هستند که شبکه همبند مربوط به خوشه‌ها جزء داده‌های مسئله است. این شبکه می‌تواند یک شبکه ستاره‌ای[2]، حلقه‌ای[3]، درختی[4] و یا هر نوع دیگری باشد. همبند بودن شبکه درون خوشه‌ای از ملزومات این مسئله است. برخلاف گره‌های درون یک خوشه، شبکه‌ای میان خوشه‌ها وجود ندارد و این خوشه‌ها جدا از هم هستند. در نتیجه برای برقراری اتصال خوشه‌ها با یکدیگر ناچار به ایجاد یال و طراحی شبکه‌ای میان آنها هستیم.

ارتباط هر خوشه با سایر خوشه‌ها از طریق گره منتخب آن خوشه — یا هاب[5] – و شبکه بین خوشه‌ای[6] صورت می‌گیرد. هاب در هر خوشه، گره‌ایست که علاوه بر عضویت در شبکه درون خوشه‌ای عضو شبکه بین خوشه‌ای نیز می‌باشد. اتصال خوشه‌ها به یکدیگر باید به گونه‌ای باشد که تمامی آنها به یکدیگر متصل بوده و خوشه‌های جدا وجود نداشته باشند. $k$ کالا در این شبکه جریان دارد که مجموعه $K$ را تشکیل می‌دهند و هریک از گره‌ها ممکن است از این کالاها عرضه یا تقاضا داشته باشند. برقراری جریان از هر یال دو نوع هزینه در بر دارد: هزینه ایجاد یال (در صورتی که یال وجود نداشته باشد) و هزینه انتقال کالا. اولی هزینه ثابت است و به میزان جریان در یال بستگی ندارد در حالیکه هزینه دوم متغیر است و با میزان جریان انتقالی از یال ارتباط مستقیم دارد. میزان عرضه یا تقاضای گره‌ها از هر یک از کالاها، هزینه ثابت متناظر هر یال و هزینه متغیر حمل و نقل در هر یال از قبل معین شده است.

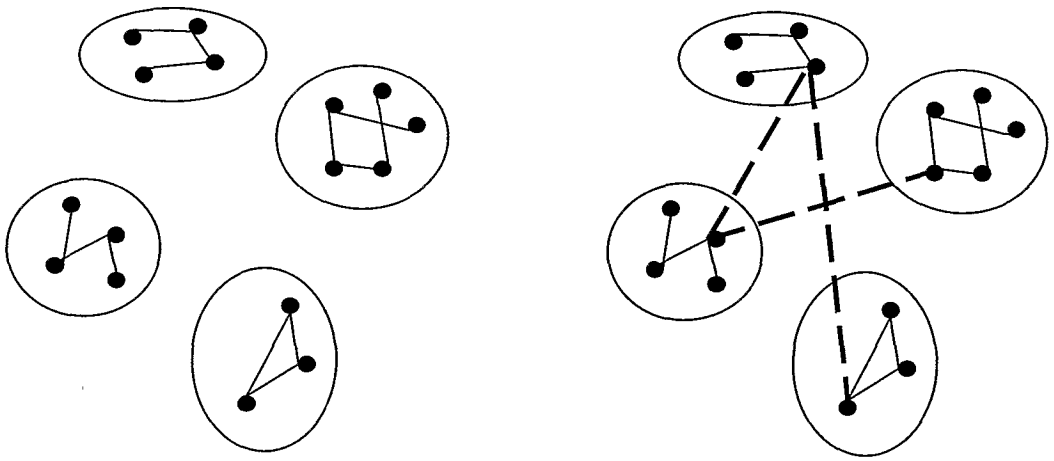
با در نظر گرفتن توضیحات فوق، مسئله مورد بحث عبارتست از طراحی شبکه‌ای که بر اساس آن تمام خوشه-ها با یکدیگر در ارتباط باشند، برقراری جریان کالاها در آن شبکه سبب تامین عرضه و تقاضای گره‌ها شود و در نهایت این شبکه دارای کمترین هزینه باشد. مسئله فوق، "مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت[7]" نامگذاری شده است.

---

[1] - Network Design
[2] - Star
[3] - Ring
[4] - Tree
[5] - Hub
[6] - Backbone
[7] - Clustered Fixed Charge Multi commodity Transshipment Problem(CFCMTP)

با دقت در این مسئله در می‌یابیم که برای طراحی شبکه نهایی در آن پنج فعالیت اساسی باید صورت گیرد: انتخاب هاب در هر خوشه، طراحی شبکه درون و بین خوشه‌ای و مسیریابی مواد در شبکه‌های درون و بین خوشه-ای. در فصل‌های بعدی اشاره خواهیم کرد که این سه فعالیت بایستی به صورت همزمان انجام گیرد و اجرای گام به گام آنها کمک چندانی برای حل مسئله نخواهد کرد. این امر سبب بروز پیچیدگی‌های زیادی برای حل مسئله خواهد شد بطوریکه مسئله مزبور به لحاظ پیچیدگی محاسباتی از رده مسائل *NP-hard* است. اثبات این ادعا در فصل‌های آتی بیان خواهد شد.

در شکل (۱-۱- الف) یک شبکه سلسله مراتبی قبل از طراحی شبکه بین خوشه‌ای نشان داده شده است که یک طراحی امکانپذیر برای این شبکه به منظور اتصال خوشه‌ها به یکدیگر در شکل (۱-۱- ب) صورت گرفته است. همانطور که ملاحظه می‌شود در شکل (۱-۱- الف) گره‌ها، خوشه‌ها و شبکه همبند درون هر خوشه کاملاً مشخص شده است و طراحی شبکه برای آن در شکل (۱-۱- ب) انجام شده است.



شکل (۱-۱- ب) : شمایی از یک شبکه طراحی شده برای مسئله شکل(۱-۱- الف)

———— : یال موجود ، --------- : یال ایجاد شده

به طور کل در یک مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت موارد زیر به عنوان ورودی شبکه از پیش مشخص هستند:

- ماتریس عضویت هر گره در هر خوشه با ابعاد $n*c$
- ماتریس هزینه‌های ثابت احداث هر یال با ابعاد $n*n$
- ماتریس هزینه‌های حمل و نقل کالاها برای هر یال با ابعاد $n*n$
- ماتریس عرضه و تقاضای گره‌ها از کالاها با ابعاد $n*k$
- شبکه همبند درون هر خوشه

که $n$ تعداد گره‌های کوجود در شبکه، $c$ تعداد خوشه‌ها و $k$ تعداد کالاها است.

هدف این مسئله طراحی شبکه‌ایست که ضمن اتصال خوشه‌ها به یکدیگر و تامین تقاضای گره‌ها توسط آن، کلیه هزینه‌ها را در شبکه کمینه کند. به عبارت دیگر پس از حل مسئله باید موارد زیر مشخص شود:

- در هر خوشه چه گرهی به عنوان گره هاب انتخاب شود
- برای اتصال خوشه‌ها به یکدیگر کدام یال‌ها ایجاد شوند
- میزان عبور هر کالا از هر یک از یال‌ها و جهت جریان چگونه باشد

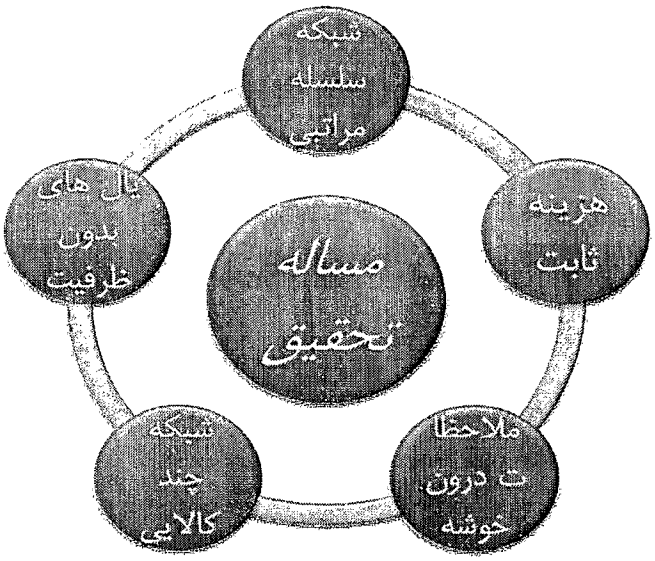
## ۱-۵) جایگاه مسئله تحقیق

مسائل طراحی شبکه دارای اجزای گوناگونی هستند که تغییر در این اجزا سبب ایجاد شبکه‌های جدید می‌شود. به دلیل گستردگی این اجزا و نیز فرصیات زیادی که در ارتباط با آنها می‌توان در نظر گرفت، مسائل طراحی شبکه از تنوع زیادی برخوردانِد. در این قسمت با دسته‌بندی این شبکه‌ها، قصد داریم تا جایگاه مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت در این حوزه را بهتر نمایان کنیم.

از آنجا که یکی از مهمترین ویژگی‌های مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت، وجود هزینه ثابت در ارتباط با استفاده از یال‌ها است بنابراین شبکه‌های یک سطحی را از این دیدگاه بررسی می‌کنیم. کلیه شبکه‌های یک سطحی را می‌توان به دو دسته شبکه‌های با هزینه ثابت[1] و شبکه‌های بدون هزینه ثابت تقسیم کرد. شبکه‌های هزینه ثابت، شبکه‌هایی هستند که برای استفاده از هر یال باید هزینه مجزایی پرداخت شود. این هزینه مستقل از میزان جریان عبوری از یال می‌باشد. وجود هزینه‌های ثابت در شبکه سبب ایجاد پیچیدگی‌هایی در حل این مسائل خواهد شد بطوریکه بسیاری از این دسته مسائل به لحاظ پیچیدگی محاسباتی در رده *NP-hard* قرار دارند مانند مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت (*Ng and Rardin,1996*). مسئله معرفی شده در این پایان نامه نیز همانطور که از نامش پیداست دارای هزینه ثابت برای استفاده از یال است.

با توجه به اینکه مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت، در شبکه‌های سلسله مراتبی تعریف می‌شوند بنابراین مسئله فوق با مباحث شبکه‌های سلسله مراتبی رابطه مستقیم دارد. همچنین این مسئله دارای خصوصیات دیگری نیز هست که مجموعه این خصوصیات سبب متمایز شدن آن از سایر مسائل موجود در حوزه طراحی شبکه می‌گردد. شکل (۱-۲) نمای کاملی از خصوصیات مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت را نشان می‌دهد.

[1] - Fixed charge




شکل ۱-۲: ویژگی‌های مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت

همانطور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، مسئله مورد بحث در این پایان نامه دارای پنج ویژگی مهم است که تعیین کننده جایگاه آن در حوزه مسائل طراحی شبکه است. مهمترین این خصوصیات طراحی یک شبکه سلسله مراتبی است. بنابراین مسئله مزبور در گروه شبکه‌های سلسله مراتبی قرار می‌گیرد. در بسیاری از شبکه‌های سلسله مراتبی ارتباطات درون خوشه در نظر گرفته نمی‌شود در حالیکه در نظر گرفتن ارتباطات و ملاحظات درون خوشه‌ای یکی از خصوصیات مهم این مسئله است که جزو نوآوری‌های این پایان نامه محسوب می‌شود. دیگر ویژگی‌های این مسئله عبارتند از: پرداخت هزینه ثابت برای استفاده از یال که به آن اشاره شد، چند کالایی بودن شبکه به این معنا که همزمان چندین کالا در شبکه و بین گره‌ها جریان دارد و بدون ظرفیت بودن یال‌ها. بدون ظرفیت بودن یال‌ها به این معناست که ظرفیت یال‌ها برای عبور جریان نامحدود در نظر گرفته می‌شود.

## ۱-۶) معرفی مسائل مرتبط

از مهمترین ویژگی‌های مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت ارتباط تنگاتنگ آن با تعدادی از مسائل دیگر طراحی شبکه است که این عامل سبب جذابیت بیشتر مسئله شده است. در حقیقت می‌توان گفت که این مسئله قابلیت تجزیه شدن به تعدادی از مسائل طراحی شبکه را داراست. این مسائل عبارتند از:

۱. مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت
۲. مسائل کلی طراحی شبکه[1]
۳. مسئله کلی طراحی شبکه با هزینه ثابت

[1] - Generalized network design problem

۴. مسائل مرتبط با شبکه‌های سلسله مراتبی

مسائل فوق را می‌توان در دو گروه دسته‌بندی کرد. گروه اول شامل شبکه‌هایی است که احداث یال در آنها مستلزم صرف هزینه ثابت است و گروه دوم مسائل مربوط به شبکه‌های سلسله مراتبی را در بر می‌گیرد. تمامی این مسائل به جز مورد اول از مسائل مربوط به شبکه‌های سلسله مراتبی هستند. برخی از مسائل فوق به لحاظ پیچیدگی از دسته مسائل *NP-hard* هستند که این عامل بر پیچیدگی مسئله خوشه‌ای حمل و نقل چند کالایی با هزینه ثابت نیز تاثیرگذار بوده است. در ادامه این مسائل را یک به یک بررسی خواهیم کرد.

## ۱-۶-۱) معرفی مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت

گراف بدون جهت $G=(N,E,K)$ را در نظر بگیرید که در آن $N$ مجموعه گره‌ها، $E$ مجموعه یال‌ها و $K$ مجموعه اقلام است. هر گره در این شبکه ممکن است از کالاهای موجود عرضه یا تقاضایی داشته باشد که میزان تقاضا یا عرضه برای هر یک از این اقلام را در گره $i \in N$ با $D_i^k$ نشان می دهیم. لازم به ذکر است که علامت این پارامتر در گره‌هایی که به جای تقاضا، عرضه دارند منفی در نظر گرفته می‌شود. برای هر یال *(i,j)* میزان ظرفیتی در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت هر یال که مقدار مثبتی است را با $u_{ij}$ نشان می‌دهیم. در ارتباط با مجموعه کالاهای موجود در شبکه، $K$ ، بیان نکته‌ای ضروری به نظر می‌رسد. در اکثر مقالات مانند ( *Thomadsen and Stidsen,2007*) هر کالا دارای یک مبدا و یک مقصد است. بنابراین در این مقالات هر جفت مبدا – مقصد، به عنوان یک کالا در نظر گرفته شده است. در حالیکه در برخی مقالات مانند (*Holmberg, Joborn et al.,2008*) دیگر برای کالاها مبدا و مقصدی مشخص نشده و تنها مقدار عرضه یا تقاضای گره از هر کالا تعیین شده است. در هر حال هر دوی این فرضیات قابل تبدیل به یکدیگر هستند و فرایند حل مسئله برای آنها یکسان است. برای عبور جریان از هر یال دو نوع هزینه باید صرف گردد. هزینه اول هزینه ثابتی است که باید برای استفاده از هر یال بپردازیم. این هزینه نامنفی را برای یال *(i,j)* با $F_{ij}$ نشان می‌دهیم. همچنین برای عبور هر واحد از کالای $k$ از یال *(i,j)* باید هزینه‌ای پرداخت شود. این هزینه که دومین هزینه در مسئله است را به شکل $C_{ij}^k$ نمایش می‌دهیم.

مسئله طراحی شبکه با هزینه ثابت با توجه به تعداد کالاهای موجود در آن و نیز با توجه به نوع یال‌هایش به انواع گوناگونی تبدیل می‌شود. در صورتی که تعداد کالاهای در جریان این شبکه بیشتر از یک کالا باشد این مسئله به یک مسئله چندکالایی[1] تبدیل می‌شود. همچنین جهت دار با بدون جهت بودن یال‌ها در این شبکه دو سبب ایجاد دو نوع مسئله متفاوت خواهد شد، اگرچه جهت دار یا بدون جهت بودن یال‌ها عامل مهمی محسوب نمی‌شود زیرا به سادگی این دو مسئله قابل تبدیل به یکدیگر هستند. مهمترین انواع مسئله‌ها در این شبکه با تغییر در ظرفیت یال‌ها

[1] - Multi commodity